

doi: 10.7690/bgzdh.2021.09.014

基于数值仿真的弹丸发射强度分析方法

薛加¹, 卢连军², 马增祥², 刘丽², 徐帅², 钟跃武²

(1. 陆军装备部驻南京地区军事代表局, 南京 225000; 2. 山东特种工业集团公司军品研究所, 山东 淄博 255201)

摘要: 针对现有弹丸发射强度计算存在的不足, 提出一种基于数值仿真的分析方法。通过对弹丸发射过程中力学仿真应用方法的分析, 以实例说明发射强度仿真模型的建立及分析类型的选择, 得到弹丸在发射过程不同时刻的强度参数结果, 计算结果与实弹实验结果基本吻合。结果表明, 该方法可为类似弹丸的发射强度研究提供理论参考。

关键词: 弹丸发射安全性; 弹体发射强度; 材料非线性; 2D 轴对称模型; 隐式动力学分析

中图分类号: TJ203; TJ410 **文献标志码:** A

Analysis Method of Projectile Launch Strength Based on Numerical Simulation

Xue Jia¹, Lu Lianjun², Ma Zengxiang², Liu Li², Xu Shuai², Zhong Yuewu²

(1. Military Representative Office of Army Equipment Department in Nanjing District, Nanjing 225000, China;
2. Military Product Research Institute of Shandong Special Industry Group Co., Ltd., Zibo 255201, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the current projectile launch strength calculation, an analysis method based on numerical simulation is proposed. Through the analysis of the application method of mechanical simulation in the process of projectile launch, the establishment of the simulation model of launch strength and the selection of the analysis type are explained by example, and the results of the projectile strength parameters at different times in the process of projectile launch are obtained. The calculated results are basically consistent with the experiments results. The results show that this method can provide a theoretical reference for the study of projectile launch strength.

Keywords: launch safety of projectile; projectile launch strength; materials' nonlinearity; 2D axis symmetric model; implicit dynamics analysis

0 引言

弹丸在发射过程中承受着各种复杂的动载荷, 动载荷又作用于结构复杂的弹丸, 很难计算得出解析解。弹药工程上常用的布林克方法^[1]虽然简单, 但由于弹丸结构复杂性及弹底存在, 实际结构与简化的力学模型差异较大, 其应力分布与圆筒假设相差甚远, 为此布林克方法有一定的局限性。

弹药新产品研发常需采用数值模拟法去仿真弹丸的发射过程, 以缩短研发周期。由于受多因素的影响, 目前此方法在国内尚未普及。在有限元分析中, 有若干针对性的建模方式与分析种类以应对结构解决结构受力问题, 与结构强度相关的数值仿真方法有若干分析种类, 如: 流固耦合分析、静态分析、准静态分析、瞬态隐式与显式分析等。对于弹丸发射过程强度计算问题, 在有限元分析中如何假设与简化模型等建模、采用何种分析方法最为便捷有效等相关文献较少; 因此, 笔者通过对弹丸发射过程中的力学仿真应用方法的阐述与总结, 提出一种基于数值仿真的分析方法。

1 仿真分析假设与建模

1.1 基本假设

为简化仿真计算难度和节省计算时间, 作如下假设:

1) 假定火炮身管为刚体。使用膛压时间曲线加载, 取代发射装药的燃烧过程, 不做火药气体与弹丸流固耦合分析。

2) 不计弹丸前端空气动力、离心力和章动力的影响, 不计压弹带引起的初始应力和变形的影响^[2]。

3) 忽略发射过程的瞬间温升, 可能对弹丸零部件材料性能属性的影响。

4) 忽略弹带坡膛挤进过程, 不计弹带在挤进过程中的材料损失。分析过程主要计算其进入身管之后的压力^[2]。

5) 忽略弹丸重力影响, 假定炮管与弹丸处于理想间隙状态, 相互间无摩擦与碰撞^[2]。

1.2 弹丸模型结构简化

笔者主要研究弹体的发射强度。为了计算过程

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-25

作者简介: 薛加(1989—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事质量监督研究。E-mail: Asdfyangzhou@sina.com。

中建模方便,对弹丸零件结构可作如下简化:

1) 尾翼弹丸可忽略弹丸末端尾翼片,对尾翼座进行相应的结构简化。本例为旋转弹丸,在有限元中分别创建风帽、弹体、装药、弹带、接螺和底螺 6 个等效零件,并对弹丸零件不影响结构发射强度的细部结构(如倒角之类)予以忽略。

2) 弹丸零组件结构上各自独立,考虑零件轴向端面接触面之间的接触行为及连接件的螺纹连接,按照实际情况设置零组件螺纹连接,并根据计算需求选择不同的材料属性。

1.3 有限元分析模型

因为绝大多数弹丸结构几何具有 2D 轴对称结构,在弹丸发射历程中所受的载荷与约束也呈现 2D 轴对称,为此可将组成弹丸的零件简化为 2D 轴对称模型。若弹丸中个别零件结构为非几何具有 2D 轴对称结构,则需建立 1/4 实体模型。

1.4 网格与元素选择

四边形网格以四边形为主网格,计算精度远优于二阶三角形网格,弹丸发射强度涉及安全性,因此弹丸零件应选择以四边形为主网格,并根据网格质量情况,确定选择平面元素。笔者采用减缩积分单元并考虑沙漏,实施相应的控制措施。

2 仿真分析类型的确定、优缺点及选择原则

2.1 仿真分析类型的确定

动态时间响应分析,用来计算结构在与时间相关的非周期性载荷作用下的动态特性。利用有限元法确定弹丸是否采用瞬态动力学分析,通常需进行弹丸的模态分析,以计算获得弹丸低阶的频率周期,并与弹丸发射过程作用时间相比较。

当弹丸在发射过程中沿炮膛做加速运动时,由于弹丸在瞬间(数 ms 内)加载至峰值数 104 g,可证实火药气体作用时间远远短于固有低阶的频率周期;因此,不能忽略弹丸发射过载惯性力的作用,分析类型应为瞬态动力学分析。

因为弹丸在发射过程中,各种载荷作用于弹体上,弹丸处于受力状态并有可能产生不可恢复的塑性变形;因此,分析类型又为瞬态塑性(材料非线性)动力学分析。在弹丸发射强度有限元分析中,瞬态动力学求解有如下 2 种分析方式:

1) 显示动力学分析。

显示动力学分析是对结构的运动方程直接进行显示积分,进而求解动力学问题。该方法能有效

处理载荷作用时间较短的大规模模型,适用于(强)非线性瞬态响应分析,采用中心差分法,不存在收敛问题,通常分析时间受限于稳定时间增量。

2) 隐式动力学分析。

隐式动力学分析是通过对时间进行隐式积分来求解动力学问题,适用于(弱)非线性瞬态响应分析,采用 Newmark 迭代法求解,存在收敛问题。

2.2 动态仿真分析类型的优缺点及选择原则

2.2.1 优缺点

显示动力学分析是基于动力学方程,为近似求解;隐式动力学分析是基于虚功原理,为真解。一般来说前者计算精度比后者差。

2.2.2 选择原则

在弹体零件设计时,通常允许弹丸圆柱部产生一定的塑性变形。对弹丸发射强度分析来讲,通常考量弹体的强度与塑性变形,应属于小变形材料非线性问题,优选隐式动力学分析。采用 Newmark 迭代算法,分析结果更精确,有利于弹丸发射安定性,只有当动态隐式分析无法收敛时,再考虑使用动态显示分析。

3 动力学分析基本方程

3.1 基本方程^[3]

瞬态动力学分析,亦称时间历程分析,是用于确定承受任意时间变化载荷的结构动力学响应的一种方法。非线性动力问题采用对时间直接微分的方法求解,其动力方程可写成

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f_{int} = \dot{f} \quad (1)$$

式中: f_{int} 为内力向量,是位移的非线性函数; M 和 C 矩阵也可与位移或速度相关。此处仅考虑内力的非线性。

3.2 数值方法

将式(1)对时间微分,有

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K^t u = \dot{f} \quad (2)$$

式中: K^t 为切线刚度矩阵。在第一次近似中,可假设方程在有限时间域 Δt 内有效,则可将方程写为

$$M\Delta\ddot{u} + C\Delta\dot{u} + K^t \Delta u = \Delta f \quad (3)$$

此方程可用迭代算式求解,用 Newmark 列式求解得到

$$(4M/\Delta t^2 + 2C/\Delta t + K) \cdot \Delta u = \Delta f + (4M/\Delta t + 2C) \dot{u}^n + 2M\ddot{u}^n \quad (4)$$

进一步对式(4)进行线性化，可以得到

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K'u = f - f_{int}^n + K'u^n. \quad (5)$$

若对式(5)的左端采用 Newmark 列式，可得到递归关系：

$$(4M/\Delta t^2 + 2C/\Delta t + K')\Delta u = f^{n+1} - f_{int}^n + (4M/\Delta t + C)\dot{u}^n + M\ddot{u}^n. \quad (6)$$

Newmark 列式是将问题线性化，然后进行加权余量近似。如果采用中心差分法，不需进行迭代，可直接写为

$$(M/\Delta t^2)\Delta u = f^n - f_{int}^n + (1/\Delta t^2)M(u^n - u^{n-1}) - C \cdot (u^n - u^{n-1})/2\Delta t. \quad (7)$$

4 材料模型

笔者主要分析弹体的发射强度与刚度，对组成弹丸零件，除弹体零件考虑塑性变形外，其余装药等零件的材料属性，只考虑其弹性。

4.1 弹性材料

组成弹丸的 6 个零件分别是风帽、装药、弹带、接螺、底螺和弹体，均有弹性行为，其零件材料属性如表 1。

表 1 弹性材料属性零件一览表

零件名称	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g/mm ³)
风帽	AL	73 084.4	0.33	2.794e-09
装药	JHL-2	185.0	0.35	2.794e-09
弹带	Cu	200.0	0.35	8.214e-09
接螺	STEEL	199 948.0	0.27	7.827e-09
底螺	AL	73 084.4	0.33	2.794e-09
弹体	STEEL	209 000.0	0.27	7.827e-09

4.2 弹体塑性模型及材料参数

4.2.1 弹体材料塑性模型

弹体材料为 30Cr2Ni4MoV，为了较为准确考量弹体可能发生的塑性变形行为，弹体材料采用 Johnson-Cook 塑性模型^[4]，其公式为：

$$\sigma_e = \left\{ A + B(\epsilon_e^p)^n \right\} \left\{ 1 - T^{*m} \right\} \left\{ 1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right\}. \quad (8)$$

式中： σ_e 为 Von Mises 流动应力； ϵ_e^p 为等效塑性应变； $\dot{\epsilon}^* = \epsilon_e^p / \dot{\epsilon}_0$ 为相对等效塑性应变率， $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ； $T^{*m} = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度，其中， T_m 与 T_r 为材料的熔点与室温。

4.2.2 弹体 Johnson-Cook 模型参数

弹体材料牌号为 30Cr2Ni4MoV，其材料采用 Johnson-Cook 塑性模型，其参数见表 2。

表 2 弹体材料模型及参数

A/MPa	B/MPa	M/MPa	n/MPa	融化温度/°C	过渡温度/°C
1 495	810	1.06	0.497	0	0

5 弹丸发射时载荷

5.1 弹丸膛底压力载荷

在弹丸研发初期，若没有同口径同类型的弹丸膛底压力载荷 P-T 曲线可利用，可以捕捉最大膛压时刻的载荷。利用经简化定义近似的三角波时间加载荷函数来模拟第二临界状态，即膛压达到最大时弹体的受力情况，其计算结果不够准确，仅供参考。

本文中所做的随时间变化载荷的动态分析，利用实测的弹丸膛底压力载荷 P-T 曲线的变化，模拟弹丸发射过程。将实测 P-T 曲线通过使用从图形中获取数据软件，获得“表”数据。这样可通过“表”的形式拟合弹丸加载过程。

5.2 旋转弹丸所产生的切向应力

由弹丸旋转所产生的切向应力与弹丸速度的平方成正比，且最大值发生在炮口处，计算最大膛压的弹丸发射强度时，可忽略弹丸旋转所产生的切向应力的影响。

6 数值计算结果与分析

综上所述，为了获取较高计算精度，确保弹丸发射安全性，弹丸零部件强度仿真计算选择隐式动力学分析较适宜。

6.1 计算结果

通过有限元后处理器，可方便查找组成弹丸诸零件的等效应力、位移的大小及分布。此处仅介绍弹体的受力情况及弹体圆柱部径向位移情况。

1) 弹体等效应力。

弹体最大有效应力位于弹体上弹槽上圆弧处，最大等效应力为 9.397e+02 MPa。图 1 为弹丸等效应力的分布。

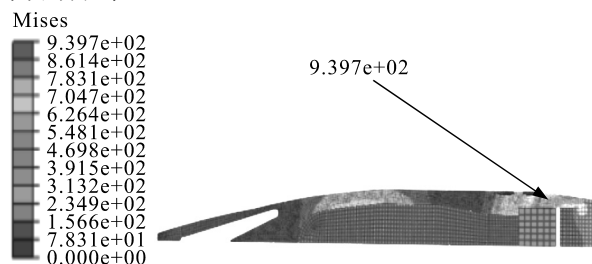


图 1 弹体有效应力